

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дунаевский, С.М. Магнитные фазовые диаграммы манганитов в области их электронного легирования / С.М. Дунаевский // Физика твердого тела. 2004. Т.46. №2. С.193.
2. Ritter, C. Structural and magnetic properties of double perovskites  $AA'FeMoO_6$  ( $AA' = Ba_2, BaSr, Sr_2$  and  $Ca_2$ ) / C. Ritter [et. al.] // Journal of Physics: Condensed Matter. 2000. Vol.12. P.8295.
3. Kalanda, N. Interplay between phase formation mechanisms and magnetism in the  $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$  metal-oxide compound / N. Kalanda [et al.] // Crystal Research and Technology. 2011. Vol. 46. P.463.
4. Blokhin, A.V. Thermodynamic properties of  $[C_6mim][NTf_2]$  in the condensed state / A.V. Blokhin [et al.] // Journal of Chemical and Engineering Data. 2006. Vol. 51. P.1377.

**ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СТРУКТУРЫ  
МЕТАЛЛ (Al) – ДИЭЛЕКТРИК ( $Si_3N_4$ ) – ПОЛУПРОВОДНИК (n-Si)  
В РЕЖИМАХ СИЛЬНОЙ ИНВЕРСИИ И ОБОГАЩЕНИЯ**

**Н. А. Поклонский<sup>1</sup>, Н. И. Горбачук<sup>1</sup>, С. В. Шпаковский<sup>2</sup>,  
П. С. Бритько<sup>1</sup>, П. И. Цибулько<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, [gorbachuk@bsu.by](mailto:gorbachuk@bsu.by)

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ», Минск, Беларусь

1. Нитрид кремния используется при производстве полупроводниковых приборов [1, 2]. Однако большая плотность электронных и дырочных ловушек как в объеме [3], так и на границе раздела, ограничивает применение нитрида кремния [4] в качестве подзатворного диэлектрика в МДП транзисторах, но позволяет использовать  $Si_3N_4$  при создании элементов запоминающих устройств [2, 3].

Традиционно для исследования границ раздела диэлектрик/полупроводник используются методы емкостной спектроскопии. Наличие высокой плотности электронных и дырочных ловушек приводит к дополнительной частотной зависимости емкости и затрудняет анализ экспериментальных данных. Выполнение измерений в широком интервале частот, построение и анализ эквивалентных схем замещения (ЭС), составляющие суть импедансной спектроскопии, позволяют существенно дополнить информацию, полученную из анализа традиционных вольт-фарадных характеристик.

Цель работы — исследовать импеданс МДП-структуры Al/ $Si_3N_4$ /n-Si в зависимости от частоты электрического поля и предложить эквивалентные схемы замещения для случаев обогащения n-Si вблизи границы  $Si_3N_4$ /n-Si электронами и сильной инверсии (изменение типа электропроводности) n-Si вблизи этой границы под действием постоянного электрического напряжения между Al и n-Si.

2. МДП-структуры изготавливались на пластинах (100) монокристаллического кремния n-типа проводимости с удельным сопротивлением 4,5 Ом·см (КЭФ-4,5), выращенных методом Чохральского. Толщина пластин — 380 мкм. Слой нитрида кремния осаждался плазмохимическим методом из смеси моносилана и аммиака. Толщина слоя  $Si_3N_4$  составляла 70 нм. На планарной стороне пластины поверх слоя нитрида кремния термическим напылением наносился слой алюминия толщиной 0,7 мкм. Площадь, покрытая алюминиевой металлизацией на нитриде кремния, составляла  $1,85 \times 1,85 \text{ мм}^2$ . Для создания омического контакта к непланарной стороне кремниевой пластины проводилась диффузия фосфора по стандартной технологии

[1]. Контакты к непланарной стороне формировались напылением Al с последующим вжиганием при температуре 400 °С в атмосфере азота. Толщина слоя алюминия на омическом контакте к непланарной стороне — 0,7 мкм. Пластины механическим скрайбированием разделялись на кристаллы площадью 2,5×2,5 мм<sup>2</sup>.

Измерения зависимостей действительной  $Z'$  и мнимой  $Z''$  части импеданса  $Z = Z' + iZ''$  от частоты  $f$  электрического поля проводились на измерителях LCR Agilent E4980A и Agilent 4285A в диапазоне 20–3·10<sup>7</sup> Гц. Амплитуда синусоидального напряжения не превышала 40 мВ. Для предотвращения несанкционированного перехода МДП-структур в режим глубокого обеднения, измерения выполнялись при комнатной температуре и освещенности ≈ 70 лк.

3. На рис. 1 представлены вольт-фарадные характеристики структур Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/n-Si, построенные по результатам измерений на частотах 1, 10, 100 кГц и 1 МГц. Видно, что при напряжениях  $U < -24$  В структуры находятся в режиме сильной инверсии, а при  $U > -15$  В в режиме обогащения. Смещение напряжения плоских зон ( $U_{fb} \approx -21,2$  В) связано со значительным положительным зарядом, захваченным ловушками в объеме и на границе раздела Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/n-Si. В режиме обогащения емкость структуры практически не зависит от частоты в интервале от 20 Гц до 2 МГц. В режиме сильной инверсии большие (по сравнению с другими частотами) значения измеренной при  $f = 1$  кГц емкости связаны с дополнительной генерацией носителей в области пространственного заряда и по периферии кристалла.

На вставке рис. 1 показаны зависимости действительной части импеданса  $Z'$  от напряжения смещения  $U$ . Обращает на себя внимание то, что для интервала значений  $U$  от –40 до –15 В характерна сильная частотная зависимость  $Z'$ . Например, при увеличении частоты с 1 кГц до 1 МГц величина  $Z'$  снижается больше, чем на четыре порядка. В режиме обогащения зависимость  $Z'(f)$  выражена намного слабее.

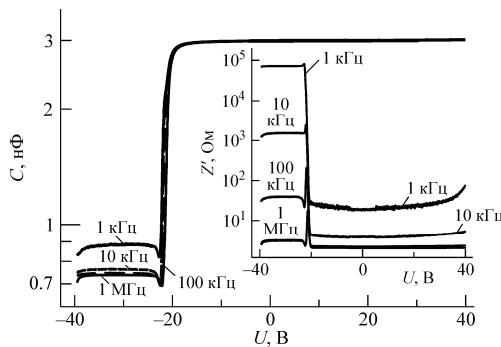


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики структуры Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/n-Si. На вставке — зависимости действительной части импеданса  $Z'$  от постоянного напряжения смещения  $U$

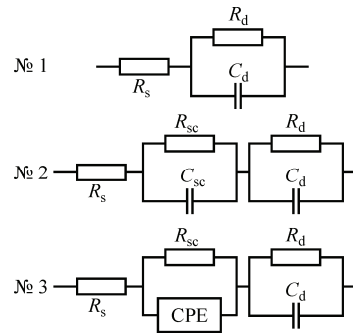


Рис. 2. Эквивалентные схемы замещения структуры Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/n-Si: № 1 — в режиме обогащения; № 2 и № 3 — в режиме сильной инверсии

Как правило [2], в режиме обогащения эквивалентная схема МДП-структуры состоит либо из одного конденсатора, либо из конденсатора, соединенного параллельно с резистором. Емкость конденсатора при этом соответствует емкости диэлектрика  $C_d$ , сопротивление резистора — сопротивлению  $R_d$  диэлектрика. Однако, в случае, когда угловая частота  $\omega = 2\pi f \gg 1/R_d C_d$ , необходимо учитывать сопротивление полупроводниковой подложки  $R_s$ . Поэтому для описания частотной зависимости импеданса структуры  $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$  в режиме обогащения нами использовалась ЭС, представленная на рис. 2 (схема № 1). В результате аппроксимации были получены следующие значения для элементов ЭС № 1:  $R_d = (4,03 \pm 0,06) \cdot 10^7$  Ом;  $C_d = (3,03 \pm 0,02) \times 10^{-9}$  Ф;  $R_s = 3,49 \pm 0,02$  Ом. На рис. 3 показаны измеренные при  $U = 40$  В и рассчитанные зависимости действительной части импеданса  $Z'$  структуры от частоты, а на рис. 4 — зависимости емкости  $C$  от частоты  $f$ . Практически во всем интервале частот наблюдается удовлетворительное согласие результатов эксперимента и расчетов.

В режиме сильной инверсии ЭС МДП-структуры обычно [2] состоит лишь из конденсатора, соответствующего емкости диэлектрика, и последовательно соединенной с ним параллельной  $RC$ -цепи, моделирующей емкость  $C_{sc}$  и активное сопротивление  $R_{sc}$  области пространственного заряда в полупроводнике. С учетом полученных результатов и данных для описания зависимости  $Z'(f)$  и  $C(f)$  структуры, использовались ЭС замещения, представленные на рис. 2 (ЭС №2 и ЭС №3). В отличие от известных, ЭС №2 учитывает сопротивление подложки, а ЭС №3 — содержит элемент постоянной фазы (CPE). Адмитанс  $Y = 1/Z$  элемента CPE по определению зависит от частоты  $\omega = 2\pi f$  как:  $Y_{CPE} = A_0(i\omega)^\alpha = A_0\omega^\alpha [\cos(0,5\pi\alpha) + i \sin(0,5\pi\alpha)]$ , где  $A_0$  — числовой коэффициент, размерность которого зависит от значения  $\alpha$ . Введенный в ЭС № 3 элемент CPE учитывает дополнительную частотную дисперсию, которая возможна вследствие перезарядки центров с глубокими уровнями в области пространственного заряда [5]. Как следует из данных, представленных на рис. 3 и 4 лучшее согласие с результатами измерений при  $U = -40$  В дает использование ЭС №3. В результате аппроксимации были получены следующие значения для элементов ЭС № 3:  $R_d = (3,3 \pm 0,9) \cdot 10^7$  Ом;  $C_d = (3,02 \pm 0,03) \cdot 10^{-9}$  Ф;  $R_{sc} = (2,13 \pm 0,04) \cdot 10^5$  Ом;  $\alpha = 0,985 \pm 0,002$  Ом;  $A_0 = (1,1 \pm 0,03) \cdot 10^5$  Ом $^{-1} \cdot \text{с}^\alpha$ ;  $R_s = 3,0 \pm 0,3$  Ом.

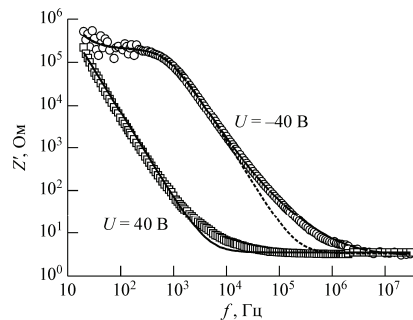


Рис. 3. Зависимости действительной части импеданса  $Z'$  от частоты  $f$ . Точки — экспериментальные данные. Сплошная линия — аппроксимация по эквивалентной схеме № 1, штриховая — № 2, пунктирная — № 3. Указаны значения напряжения  $U$ , при которых проводилась регистрация зависимостей  $Z'(f)$

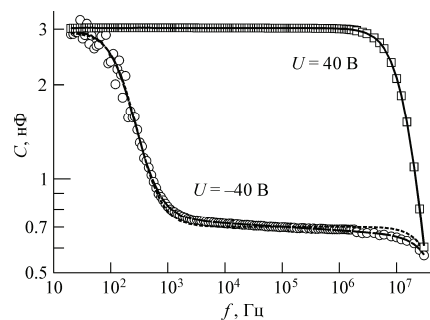


Рис. 4. Зависимости емкости  $C$  от частоты  $f$ . Точки — экспериментальные данные. Сплошная линия — аппроксимация по эквивалентной схеме № 1, штриховая — № 2, пунктирная — № 3. Указаны значения напряжения  $U$ , при которых проводилась регистрация зависимостей  $Z'(f)$

4. Таким образом, показано, что для ЭС структуры  $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$  в режиме обогащения следует учитывать сопротивление  $n\text{-Si}$ , а в режиме сильной инверсии — дополнительную частотную дисперсию импеданса в области пространственного заряда.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Электроника и фотоника» (задание 1.1.03).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология СБИС. В 2-х книгах / Под ред. С. Зи. — М.: Мир, 1986. — 404 с. + 453 с.
2. Sze, S.M. Physics of semiconductor devices / S.M. Sze, K.K. Ng. — N.Y.: Wiley, 2007. — 832 p.
3. Гриценко, В.А. Электронная структура нитрида кремния / В.А. Гриценко // УФН. — 2012. — Т. 182, № 5. — С. 531–541.
4. Насыров, К.А. Туннельная инжекция дырок через ловушки в  $\text{SiO}_2$ : эксперимент и теория / К.А. Насыров, С.С. Шаймеев, В.А. Гриценко // ЖЭТФ. — 2009. — Т. 136, № 5(11). — С. 910–918.
5. Two constant phase element behaviour of the admittance characteristics of GaAs metal-insulator-semiconductor structure with deep traps / S. Kochowski [et al.] // Thin Solid Films. — 2003. — V. 444, № 1-2. — P. 208–214.

### ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ВИБРАТОР ИЗ ГРАФЕНА: УСЛОВИЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Н. А. Поклонский, Е. Ф. Кисляков, С. А. Вырко, С. В. Раткевич

Белорусский государственный университет, poklonski@bsu.by

Методом Пуанкаре–Боголюбова исследованы нелинейные уравнения, описывающие электромеханический вибратор на основе графена, и установлены величины параметров системы, при которых происходит генерация электрических колебаний вибрирующим графеном (подвижным катодом).

#### ВВЕДЕНИЕ

Исследование автоколебательных систем (т. е. систем с малым по сравнению с периодом возникающих автоколебаний временем взаимодействия с источником энергии) актуально как для физики нелинейных явлений в классических и квантовых системах, так и для приложений (см., например, обзоры [1, 2]). Расширяется круг материалов, используемых в качестве элементов автоколебательных систем. Так, в работе [3] была предложена конструкция генератора переменного напряжения с нанополоской графена в качестве основного элемента (см. рис. 1), и показана возможность генерации электрических колебаний в линейном приближении.

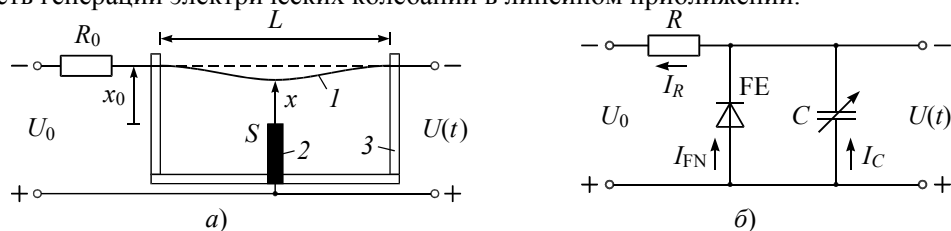


Рис. 1. а) конструкция электромеханического вибратора: 1 — нанополоска графена (катод), 2 — анод, 3 — диэлектрик; б) эквивалентная электрическая цепь устройства: FE — автоэмиссионный диод